

# MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UMA CENTRAL HIDROELÉCTRICA SUBTERRÂNEA UTILIZANDO PARÂMETROS GEOMECÂNICOS OBTIDOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Tiago Miranda & António Gomes Correia  
Universidade do Minho, Guimarães, Portugal  
Luís Ribeiro e Sousa  
Universidade do Porto & LNEC, Porto, Portugal  
Celso Lima  
EDP Produção & Universidade do Porto, Porto, Portugal

**RESUMO:** *No Norte de Portugal está a ser construído um grande complexo hidroeléctrico subterrâneo como reforço de potência de um sistema hidroeléctrico existente desde 1951. Este novo complexo inclui um circuito hidráulico com 4,4 km de comprimento e duas cavernas para o conjunto da central. Os parâmetros geomecânicos das formações graníticas interessadas foram obtidos através de um programa chamado GEOPAT, que utiliza técnicas de inteligência artificial. Permite calcular parâmetros geomecânicos para a modelação do comportamento estrutural das obras subterrâneas. Foram desenvolvidos modelos numéricos para a análise do comportamento das cavernas do complexo da central utilizando parâmetros obtidos pelo GEOPAT. Os valores calculados a partir dos modelos numéricos foram comparados com os correspondentes valores observados apresentando na globalidade uma boa concordância.*

## 1. INTRODUÇÃO

Nos anos 90 a CPPE (Companhia Portuguesa de Produção de Electricidade), empresa pertencente ao grupo EDP, decidiu levar a cabo um reforço de potência do aproveitamento da Venda Nova. O novo complexo hidroeléctrico, denominado Venda Nova II está equipado com unidades reversíveis e tenciona tirar partido da diferença de cotas existente entre dois reservatórios, aproximadamente 420 m (Lima et al., 2002; Plasencia, 2003). O maciço interessado por este complexo subterrâneo é predominantemente granítico. Este complexo envolveu a construção de importantes obras geotécnicas subterrâneas das quais se mencionam as seguintes (Figura 1):

- Circuito hidráulico com um túnel em carga com 2,8 km de comprimento, 7,3 m de diâmetro e 14,8% de inclinação e um túnel de restituição com 1,4 km de comprimento, 6,3 m de diâmetro e 2,1% de inclinação.
- Duas cavernas localizadas a 350 m de profundidade, para a central e para os transformadores, com forma rectangular em planta com  $19,0 \times 60,5 \text{ m}^2$  e  $14,1 \times 39,8 \text{ m}^2$ , respectivamente, ligadas por duas galerias.

- Chaminé de equilíbrio superior constituída por um poço com 415 m de altura e 5 m de diâmetro com um alargamento junto à zona superior e uma chaminé de equilíbrio inferior com 60 m de altura e o mesmo diâmetro.
- Túnel de acesso ao complexo da central, com cerca de 1,5 km de comprimento, 10,9% de inclinação e 58 m<sup>2</sup> de área.



- |                                    |                                 |
|------------------------------------|---------------------------------|
| 1 – Albufeira da Venda Nova        | 7 – Túnel de restituição        |
| 2 – Tomada de água superior        | 8 – Caverna da central          |
| 3 – Tomada de água inferior        | 9 – Caverna dos transformadores |
| 4 – Chaminé de equilíbrio superior | 10 – Galerias de ventilação     |
| 5 – Chaminé de equilíbrio inferior | 11 – Túnel de acesso            |
| 6 – Túnel em carga                 | 12 – Túneis auxiliares          |

Figura 1 – Perspectiva geral do aproveitamento hidroelétrico da Venda Nova II (Lima et al., 2002)

Nesta comunicação são realizadas análises numéricas do comportamento estrutural das cavernas do complexo, considerando as várias fases construtivas. Os parâmetros geomecânicos das formações graníticas foram obtidos através da aplicação do sistema baseado em conhecimento (SBC) designado GEOPAT desenvolvido na Universidade do Minho (Miranda, 2003). Este sistema utiliza técnicas de inteligência artificial e permite obter parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas distinguindo os casos da ocorrência de maciços rochosos, terrosos e heterogêneos. Os resultados dos modelos numéricos são comparados com os valores monitorizados correspondentes.

## 2. O COMPLEXO SUBTERRÂNEO DA CENTRAL

### 2.1 Descrição

O complexo da central consiste, como já foi referido, em duas cavernas (da central e da sala dos transformadores) interligadas por duas galerias. Em planta, as cavernas apresentam uma forma rectangular e têm as seguintes dimensões para a caverna da central e dos transformadores, respectivamente: 19,0x60,5 m<sup>2</sup> e 14,1x39,8 m<sup>2</sup>. A distância entre eixos das cavernas é de 45 m e ambas as cavernas são constituídas por paredes verticais e tectos em arco. O ponto mais elevado

do arco da caverna da central está localizado 20 m acima do pavimento (nível 235), enquanto que para a caverna dos transformadores esta distância é de 10,45m (Figura 2).

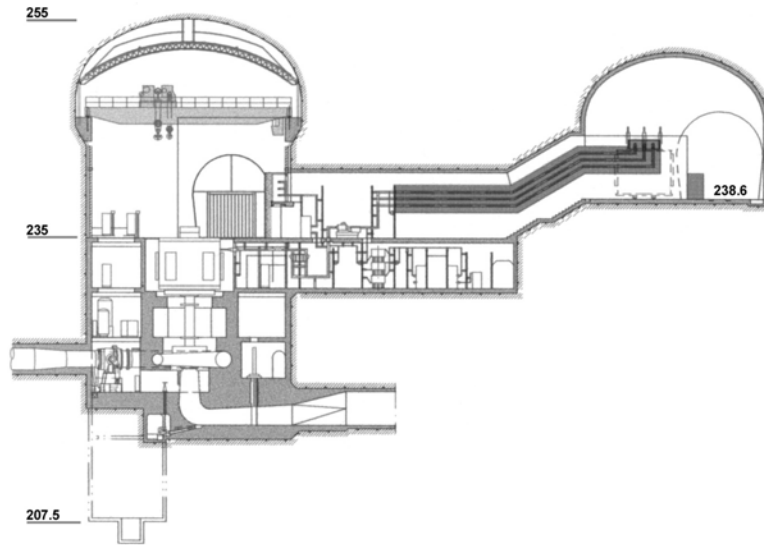


Figura 2 – Vista em corte do complexo da central

As cavernas estão localizadas numa zona onde foi detectada a existência de duas descontinuidades subverticais que se identificam na Figura 3 por E e F. Baseado na interpretação da prospecção geotécnica decidiu-se mover as cavernas na direcção NE.

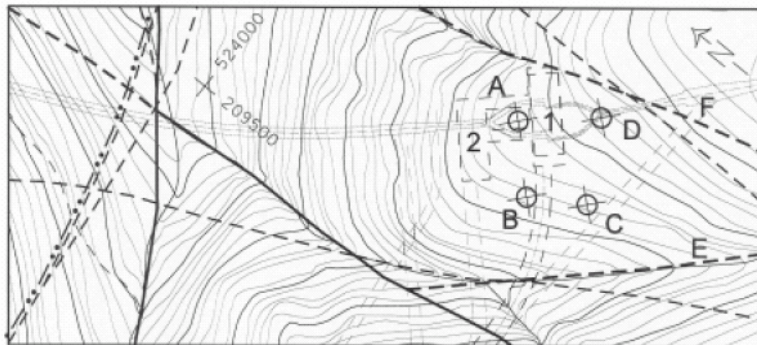


Figura 3 – Implantação da central

Em termos geológicos a região é caracterizada por um granito porfirítico de grão grosseiro, biotítico e moscovítico. As cavernas do complexo estão instaladas num maciço rochoso granítico de grão médio com tendência porfirítica com veios de quartzo e/ou pegmatito que são ocasionalmente cor-de-rosa e inclusões de micaxisto bastante quartzítico.

## 2.2 Prospecção geotécnica

Na zona das cavernas foram realizadas quatro sondagens verticais, definindo os vértices de um quadrilátero. Os comprimentos das sondagens variaram entre os 271,0 m e os 381,6 m e a sua posição foi controlada a cada 50 m (Plasencia, 2003) (Figura 4).

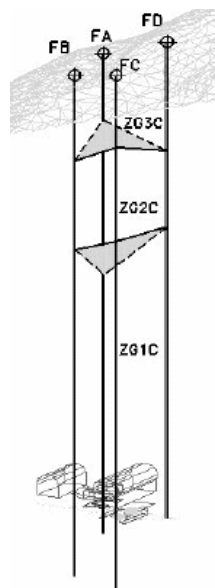


Figura 4 – Esquema do modelo geológico-geotécnico do maciço rochoso (Plasencia, 2003)

A caracterização geomecânica das amostras colhidas nas sondagens e os ensaios laboratoriais permitiram realizar o zonamento do maciço apresentado na Tabela 1. As cavernas da central estão localizadas na zona ZG1C. Foram realizados ensaios sísmicos entre os furos de sondagem de forma a obter tomografias de velocidades de propagação das ondas sísmicas P (LNEC, 1997; Plasencia et al., 2000). Os ensaios foram executados a profundidades variando, aproximadamente, entre os 95 m e os 370 m. Os resultados confirmaram o zonamento previamente estabelecido. A zona onde as cavernas estão localizadas foi caracterizada com velocidades de ondas P entre os 5250 m/s e os 6000 m/s, por vezes 4750 m/s a 5250 m/s o que confirmam, também, a boa qualidade geomecânica do maciço. Nos furos de sondagem foram, ainda, realizados ensaios de permeabilidade de *Lugeon*.

Tabela 1 – Zonamento geológico-geotécnico do maciço rochoso

	Alteração	Descontinuidades	RQD	Permeabilidade	I <sub>r</sub> (MPa)	UCS (MPa)	E <sub>r</sub> (GPa)	ν
ZG3C	W3/W4-5	F3/F4-5	0-90	>10 UL	3,8	57,7	42,0	-
ZG2C	W1-2/W3	F1-2/F3	50-90	0-8 UL	6,3	96,9	51,0	-
ZG1C	W1/W2	F1/F2	90-100	<2 UL em geral	7,0	110,1	54,9	0,17

UL – unidades *Lugeon*; E<sub>r</sub> – módulo de deformabilidade da rocha intacta; I<sub>r</sub> – índice de carga pontual; ν - coeficiente de Poisson; UCS – resistência à compressão uniaxial

Após a construção do túnel de acesso foi escavada uma galeria na zona da central e paralela ao seu eixo, onde se efectuaram ensaios para caracterização da deformabilidade do maciço rochoso e avaliação do estado de tensão *in situ*, e se quantificou a fracturação do maciço. Foram executados ensaios de almofadas de grande área LFJ para a obtenção do módulo de deformabilidade do maciço que apontaram para valores entre os 33 GPa e os 40 GPa. Para a determinação do estado de tensão *in situ*, foram realizados ensaios de sobre-carotagem STT e ensaios de almofadas de pequena área SFJ. Os resultados destes ensaios mostraram que as tensões verticais e horizontais paralelas ao eixo da caverna têm a mesma magnitude e corresponde à tensão provocada pelo peso próprio do maciço acima das cavernas. Na direcção perpendicular ao eixo os valores das tensões são duas a três vezes superiores aos valores registados nas outras direcções. A partir da caracterização litológica foi possível identificar quatro famílias de descontinuidades principais.

Na Tabela 2, sumarizam-se as suas principais características de acordo com os critérios da ISRM (1978).

Tabela 2 – Características das discontinuidades (Lima et al., 2002)

Família	1	2	3	4
Direcção	N81°E	N47°E	N8°E	N50°E
Pendor	77°NNW	12°NE	83°WNW	80°NW
Continuidade	1 a 3 m	1 a 10 m	3 a 10 m	3 m
Alteração	W1-2, pontualmente W3	W1-2	W1-2 pontualmente W4	W1-2
Abertura	fechada a 0,5 mm	fechada a 0,5 mm	fechada a 0,5 mm, por vezes 2,5 mm	fechada
Espessura	0 a 0,5 mm	0 a 0,5 mm	0, por vezes 2,5 mm	0
Rugosidade	ondulante pouco rugosa a rugosa	ondulante pouco rugosa, por vezes escalonada rugosa	plana, rugosa, por vezes polida	ondulante pouco rugosa
Percolação	seca	seca	seca, pontualmente com fluxo contínuo de água	seca
Espaçamento	2 a 3 m, podendo ser 1 ou 4 m	2 a 3 m, podendo ser 1 m	1 a 2 m	5 a 6 m
Terminação	rr a xr	xx a xd	xr a rr ou xx	rr

### 2.3 Plano de monitorização

De forma a avaliar o comportamento do sistema maciço rochoso-sistema de suporte foi estabelecido um plano de monitorização para a observação dos deslocamentos no maciço. Foram instaladas marcas de convergência em várias secções (5 a 7 em cada secção) e onze extensómetros ao longo do eixo das cavernas (Figura 5). Na caverna da central, os extensómetros foram colocados em duas secções, enquanto que, na caverna dos transformadores, foram instalados em apenas uma. Os extensómetros instalados foram duplos com excepção dos triplos colocados nas paredes da caverna principal (EF1 e EF5). Na Figura 6 apresenta-se a evolução dos deslocamentos medidos nos extensómetros EF5 e EF11. Em algumas ancoragens foram instaladas células de carga.

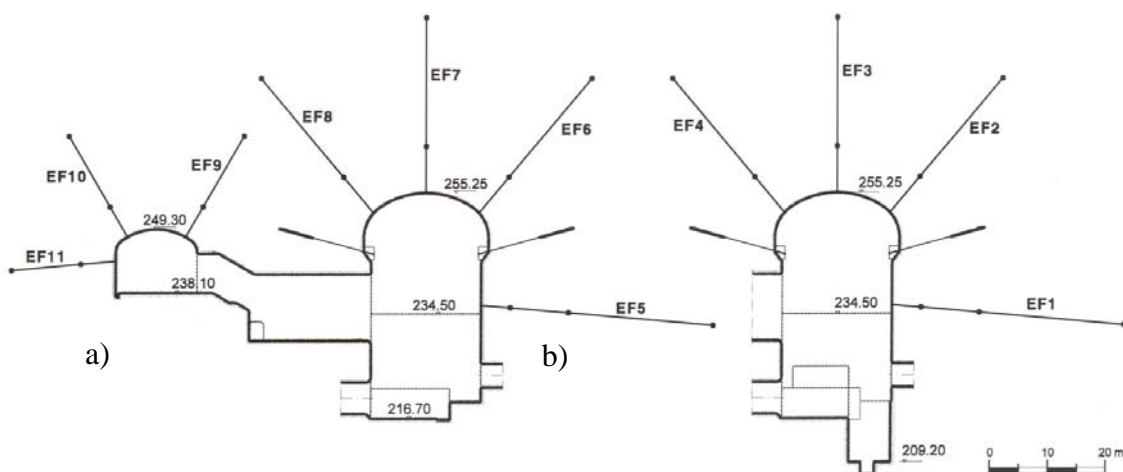


Figura 5 – Corte representativo do plano de monitorização

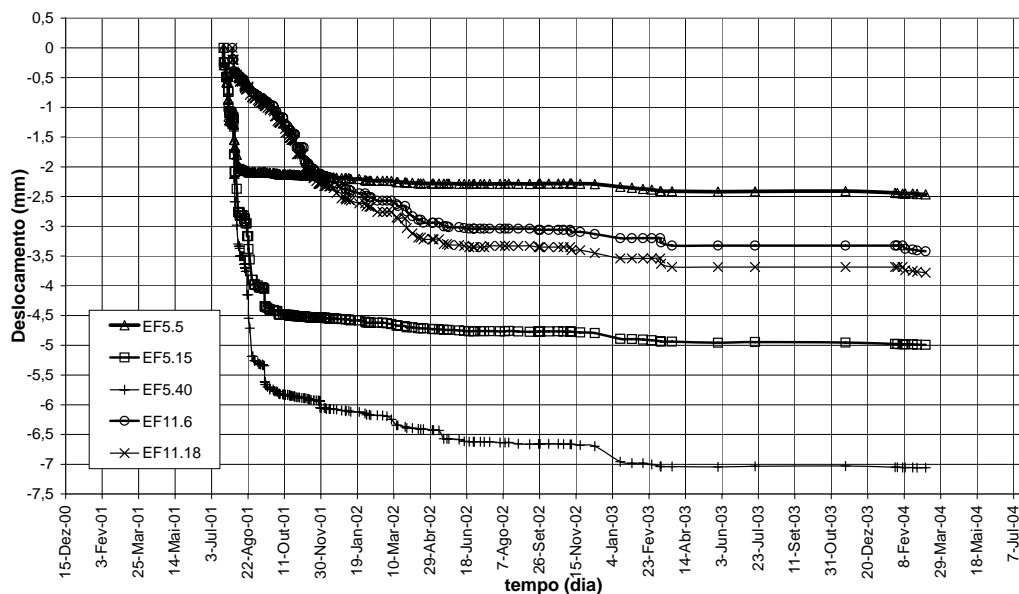


Figura 6 – Evolução dos deslocamentos nos extensômetros EF5 e EF11

### 3. SISTEMA BASEADO EM CONHECIMENTO GEOPAT

Nos processos de concepção, projecto e construção de obras subterrâneas, a experiência desempenha um papel importante. A razão fundamental reside na dificuldade em reunir informação geológica-geotécnica suficiente para avaliar o comportamento geomecânico do maciço. São indubitáveis as vantagens de congregar a experiência e conhecimentos de um ou vários especialistas. As novas ferramentas informáticas, nomeadamente as baseadas em inteligência artificial (AI), podem ter um papel importante na geração de meios de cálculo que possibilitem a inclusão dessa experiência e conhecimentos. Neste trabalho, são abordados os sistemas de AI baseados em conhecimento (SBC). A partir de uma base de conhecimentos devidamente estruturada e validada, desenvolvem-se processos de simulação de raciocínio de modo a apresentar recomendações visando a resolução de um determinado problema (Portela, 1999). Estes sistemas são normalmente utilizados para apoio à decisão num domínio limitado a uma determinada zona de conhecimento.

Foi desenvolvido um SBC designado GEOPAT (**GE**Omechanical **PA**rameters for **T**unnelling) de forma a obter os parâmetros geomecânicos em maciços rochosos, terrosos e heterogêneos para a modelação de obras subterrâneas. O sistema utiliza interfaces interactivas e foi programado utilizando três plataformas – Visual Basic, Excel e KAPPA-PC (Intellicorp, 1997). No caso dos maciços rochosos, são aplicados os sistemas empíricos RMR, Q e GSI para o cálculo dos parâmetros de resistência e deformabilidade, utilizando conhecimento acumulado e redes causais estabelecidas para organizar este conhecimento (Miranda, 2003). No caso de maciços terrosos o GEOPAT calcula parâmetros de resistência e de deformabilidade a partir de uma vasta gama de ensaios de laboratório e *in situ* distinguindo, quando possível, os casos de solos residuais dos transportados. O valor do módulo de deformabilidade fornecido tem em consideração os níveis de deformações usualmente envolvidos na construção de obras subterrâneas. Em formações heterogêneas o sistema tem implementada uma metodologia que combina a aplicação do sistema empírico RMR com ferramentas probabilísticas. O resultado é uma distribuição probabilística do valor do GSI que permite o cálculo de valores médios e característicos dos parâmetros

geomecânicos. As Figuras 7 e 8 apresentam, respectivamente, a janela de inserção dos dados para os maciços terrosos e um exemplo de resultados do GEOPAT para maciços heterogêneos.

Figura 7 – Janela para a inserção de dados para maciços terrosos

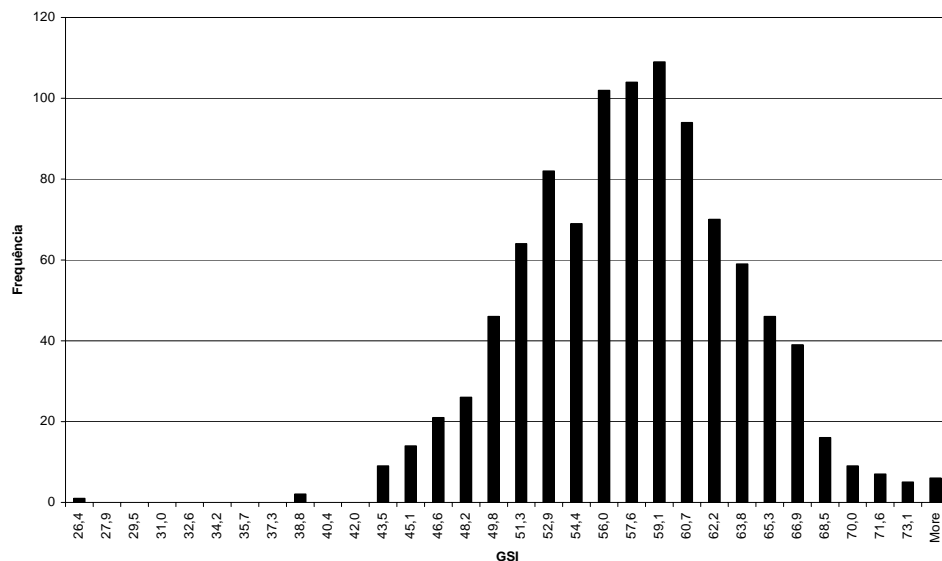


Figura 8 – Exemplo de um histograma do parâmetro GSI traçado pelo GEOPAT

O GEOPAT foi aplicado ao complexo da central utilizando os sistemas RMR e GSI. A informação disponível relativa ao parâmetro GSI indicava um valor médio de 65 mas com uma variabilidade considerável. Os valores obtidos para o RMR variaram, na maioria dos casos, entre 80 e 85. Baseado nesta informação e utilizando os resultados obtidos pelo GEOPAT determinaram-se os seguintes parâmetros geomecânicos:  $E_{MR} = 45$  GPa,  $\phi' = 54^\circ$  e  $c' = 4$  MPa.

#### 4. MODELAÇÃO NUMÉRICA

Para a modelação numérica a sequência construtiva foi simplificada relativamente à definida no projecto. Assim, as fases consideradas nos modelos numéricos desenvolvidos foram as apresentadas na Tabela 3 (Lima et al., 2002).

Tabela 8 – Fases de construção consideradas

Fase	Descrição
1	Escavação total do arco da caverna principal.
2	Aplicação de 25 cm de betão projectado no arco e pregagens com 6 m de comprimento e 25 mm de diâmetro numa malha de 2x2 m. Escavação da caverna principal até 1,5 m abaixo do nível das vigas dos carris.
3	Aplicação de 25 cm de betão projectado até 1,5m abaixo do nível das vigas dos carris. Escavação da caverna principal até ao nível da base das galerias que unem as cavernas. Aplicação de pregagens com 9 m de comprimento e 25 mm de diâmetro numa malha de 1,4x1,4 m e ancoragens de 15 m de comprimento, 25 mm de diâmetro e 75 ton. de pré-tensão.
4	Escavação das galerias que unem as duas cavernas e colocação nas paredes da caverna principal de pregagens com comprimento de 9 m e diâmetro 25 mm numa malha de 2x2 m.
5	Finalização da escavação da caverna principal.
6	Colocação de pregagens nas paredes da caverna principal com comprimentos de 6 e 9 m e diâmetro 25 mm numa malha de 2x2 m. Escavação da caverna dos transformadores.
7	Aplicação do suporte na caverna dos transformadores constituído por 25 cm de betão projectado no arco e pregagens de 25 mm de diâmetro e 6 m de comprimento segundo uma malha de 2x2 m.

A secção analisada através dos modelos numéricos foi a secção a) referida na Figura 5. O estado de tensão inicial foi assumido constante e caracterizado por uma tensão vertical igual a 9,45 MPa. Foram executadas várias simulações com diferentes valores de  $K_0$  e diferentes formas de consideração das galerias de ligação entre as cavernas. Assim, com base nos resultados dos ensaios *in situ* realizados, foi considerado um  $K_0$  igual a 1 na direcção paralela ao eixo das cavernas e  $K_0$  igual a 2, 2,5 e 3 na direcção perpendicular. As duas galerias de ligação entre as cavernas foram simuladas de três formas distintas: i) considerando a escavação total das galerias; ii) desprezando o efeito da escavação das galerias devido à sua pequena influência no comportamento global da estrutura; iii) substituindo o material na zona das galerias por outro material equivalente de características geomecânicas inferiores às do material existente.

O software utilizado nas análises numéricas foi o Phases<sup>2</sup> da Rocscience. Para a última fase escavação, para  $K_0$  igual a 2 e para a situação ii), as Figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, os deslocamentos totais e as tensões principais assim como os elementos em cedência. Os valores dos deslocamentos registados pelos extensómetros foram bastante baixos devido à boa qualidade geomecânica do maciço rochoso.

A hipótese de cálculo cujos resultados melhor se ajustaram aos valores medidos foi a que não considerou o efeito da escavação das galerias entre as cavernas (ii) e um valor de  $K_0$  de 2. Os valores mais elevados de deslocamentos registaram-se, como esperado, na parede da caverna principal devido à sua altura e ao estado de tensão *in situ* (Figura 11). Os valores das tensões no betão projectado são baixos devido à boa qualidade do maciço rochoso. As pregagens com valores mais elevados de esforço axial são as localizadas no arco da caverna principal com valores que variam entre os 10 e os 45 kN (para uma capacidade resistente máxima de 100 kN).



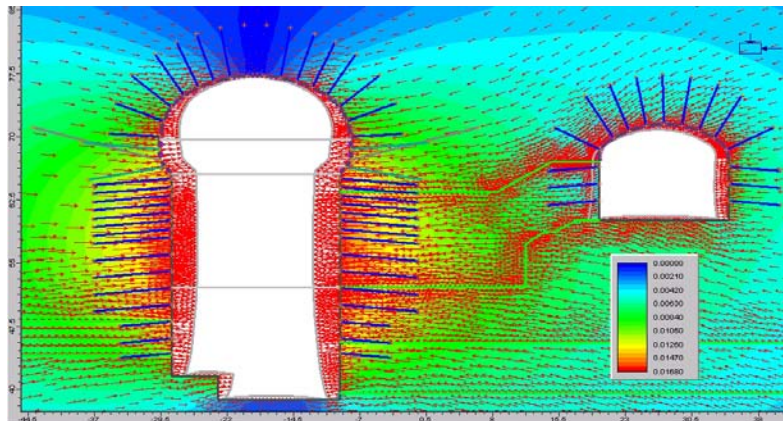


Figura 9 – Deslocamentos totais para a última fase

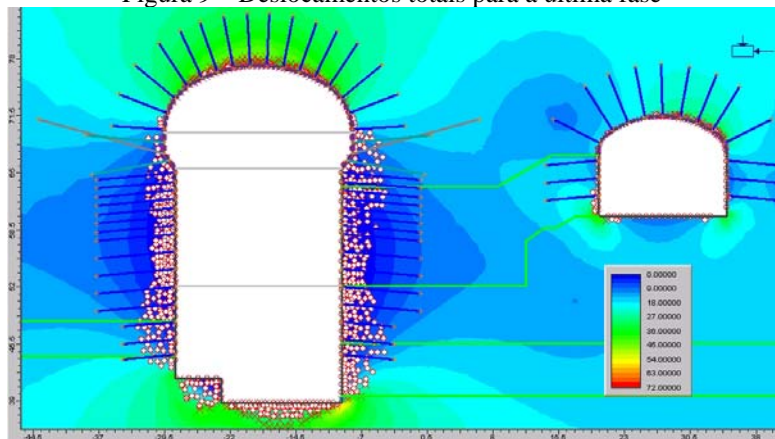


Figura 10 – Tensões principais máximas e elementos em cedência para a última fase

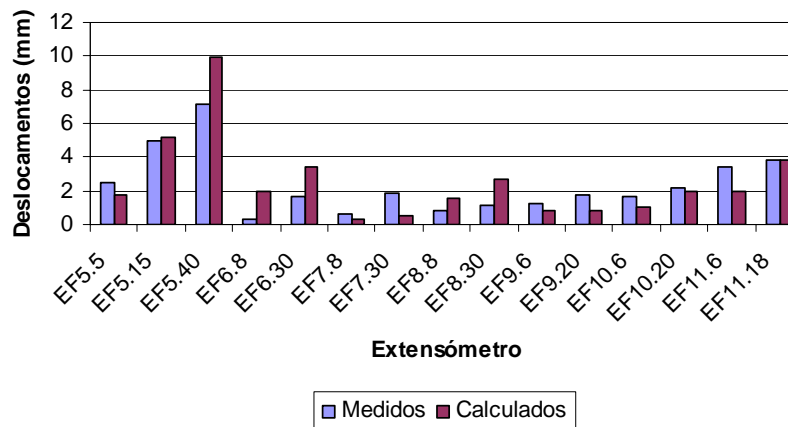


Figura 11 – Deslocamentos medidos vs deslocamentos calculados

Os deslocamentos calculados a partir dos modelos numéricos apresentam em geral uma concordância razoável com os deslocamentos medidos, para a hipótese indicada. Os maiores desvios, em termos absolutos e relativos, foram nos extensômetros inclinados EF6 e EF8. Dada a natureza complexa do problema, justifica-se, o desenvolvimento de modelos numéricos tridimensionais mais ajustado à realidade do problema.

## **5. CONCLUSÃO**

O complexo hidroeléctrico da Venda Nova II inclui um conjunto bastante importante de obras subterrâneas localizadas num maciço rochoso predominantemente granítico que a prospecção geológico-geotécnica mostrou ser de boa qualidade. Os parâmetros geomecânicos desta formação foram obtidos através de um programa que utiliza técnicas de AI designado GEOPAT. O sistema foi desenvolvido de forma a calcular os parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas distinguindo os casos de maciços rochosos, terrosos e heterogéneos. Utilizando os parâmetros obtidos foram desenvolvidos modelos numéricos para as cavernas da central.

De acordo com as hipóteses estabelecidas, as tensões calculadas para os sistemas de suporte foram na maior parte dos casos baixas. As pregagens com esforços axiais mais elevados são os que estão instalados no tecto da caverna axial com um valor máximo de 45 kN. Os valores dos deslocamentos medidos na zona das cavernas foram de reduzida magnitude. Os deslocamentos calculados apresentam uma concordância razoável com os medidos. No entanto, é necessário desenvolver modelos numéricos tridimensionais para melhorar o modelo geológico-geotécnico utilizando técnicas de retroanálise. Para além disso, o sistema GEOPAT deve ser consideravelmente melhorado e actualizado, sobretudo no que concerne à utilização de técnicas de AI.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores gostariam de expressar o seu agradecimento à EDP Produção EM por ter disponibilizado informação necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Intellicorp (1997). KAPPA-PC Development Software System, Version 2.4. USA.

ISRM (1978). Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Journal of Rock Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 15, nº 16, pp. 319-368.

Lima, C.; Resende, M.; Plasencia, N.; Esteves, C. (2002). Venda Nova II Hydroelectric Scheme Powerhouse Geotechnics and Design. ISRM News, Vol. 7, no. 2, pp. 37-41.

LNEC (1997). Seismic Tomography Between Boreholes in the Mass Interesting the Central Cavern of the Venda Nova II Scheme. Lisboa.

Miranda, T. (2003). Contribuição para a obtenção de parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas em maciços graníticos. Tese de Mestrado, pp. 186, Universidade do Minho, Portugal.

Plasencia, N. (2003). Obras subterrâneas – Aspectos da contribuição da Geologia de Engenharia na concepção e projecto. Tese de Mestrado, IST, Lisboa, 155p.

Plasencia, N.; Coelho, M. J.; Lima, C., Fialho, L. (2000). Contribuição da tomografia sísmica para a caracterização do maciço interessado pela caverna central do complexo da Venda Nova II. 7º Congresso Nacional de Geotecnia. Porto, pp. 113-122.

Portela, E. (1999). Novas metodologias de apoio ao controlo de segurança de barragens de betão. Tese de Doutoramento, IST, 481p.